

Metasomatismo y alteración hidrotermal en el Distrito Ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile

Waldo Vivallo

Departamento de Geología, Universidad de Chile,
Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile

Sergio Espinoza

Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte,
Casilla 1280, Antofagasta, Chile

Fernando Henríquez

Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Santiago de Chile,
Casilla 1C233, Santiago, Chile

RESUMEN

La mena de magnetita-apatita, en el distrito Cerro Negro Norte, Copiapó, se encuentra hospedada en rocas andesíticas, las que fueron afectadas por una intensa alteración hidrotermal. Esta dio origen, en las zonas adyacentes a los cuerpos de mena, a brechas hidrotermales, destrucción de texturas primarias y reemplazo de la mineralogía original en las andesitas. Las rocas volcánicas alteradas presentan una marcada zonación mineralógica y geoquímica en torno a los cuerpos de mena. La zona más interna corresponde a rocas fuertemente actinolitizadas, rodeadas por rocas silicificadas y con distintos grados de turmalinización. Relictos de rocas albitizadas se encuentran incluidos dentro de la zona con silicificación \pm turmalinización. Vetillas de turmalina, cuarzo-turmalina y actinolita cortan a la mena de hierro y su roca de caja. Las rocas actinolitizadas han sufrido un fuerte aporte metasomático de Ca, Mg, Fe, P, F, Cl, V, Au y B, y una lixiviación selectiva de las Tierras Raras Livianas (La, Ce, Nd, Sm), Na, K, Ti, Sr, Zr, Zn y Hf. Las rocas albitizadas están caracterizadas por una alta razón Na/K, y con la excepción de Si y Na, estas rocas presentan una disminución de los contenidos de elementos mayores; en cambio Zr, S, V, Zn y Au muestran un incremento significativo. La turmalinización va acompañada, principalmente, de un fuerte incremento de B y moderado de volátiles, Zr, S, V y As. Las relaciones temporales entre las distintas asociaciones mineralógicas de alteración y la geoquímica de las rocas alteradas, son compatibles con un fluido hidrotermal caracterizado inicialmente por altos contenidos de Ca, Mg, Fe, Na, P, F, Cl y CO₂, responsable de los procesos de actinolitización y albitización. La presencia de plagioclasa coexistiendo con actinolita, en las zonas actinolitizadas, y rocas albitizadas sugieren un pH neutro a ligeramente alcalino. Este fluido evolucionó, posteriormente, hacia uno rico en silice, B y de pH más bien ácido, responsable de las rocas silicificadas \pm turmalinizadas que constituyen el halo más externo. Las zonaciones mineralógica y geoquímica en torno a los cuerpos de mena se interpretan como un reflejo de gradientes de temperatura y composición de los fluidos hidrotermales originados durante el emplazamiento de los cuerpos macizos de magnetita-apatita, que constituyen la mena de hierro en el distrito.

Palabras claves: Hierro, Alteración hidrotermal, Metasomatismo, Geoquímica, Franja ferrífera cretácica, Cerro Negro Norte, Chile.

ABSTRACT

Metasomatism and hydrothermal alteration in the Cerro Negro Norte iron ore district, Copiapó, Chile. The magnetite-apatite ores in the Cerro Negro Norte iron district, Copiapó, are hosted by hydrothermally altered andesitic volcanic rocks. As a result of the hydrothermal activity, the primary mineralogy of the volcanic rocks was changed,

the original textures obliterated and hydrothermal breccias were formed close to the orebodies. The hydrothermally altered country rocks display a mineralogical and geochemical zonation around the orebodies, with an internal halo of actinolitized rocks followed outward by silicified±tourmalinized rocks. Patches of albite-rich rocks are enclosed within the silicified ones. Tourmaline, quartz-tourmaline, and actinolite veins cut the iron ore and its altered wallrocks. The actinolitized rocks have been strongly enriched, metasomatically, in Ca, Mg, Fe, P, F, Cl, V, Au, and B, and depleted in La, Ce, Nd, Sm, Na, K, Ti, Sr, Zr, Zn y Hf. The albitized rocks are characterized by a high Na/K ratio and with the exception of Si and Na, they are depleted in all major elements. Zr, S, V, Zn and Au display a distinct enrichment. Turmalinized rocks have a strong B enrichment, and a moderate increase of the volatile content, Zr, S, V and As. The cross-cutting relationships of the different mineral assemblages, representative of different hydrothermal events, along with the chemical composition of the altered rocks suggest a hydrothermal solution initially characterized by high contents of Ca, Mg, Fe, Na, P, F, Cl, and CO₂, which produced actinolitization and albitization around the orebodies. Coexisting plagioclase with actinolite in the internal halo of altered rocks and presence of albite-rich rocks are compatible with a neutral to slightly alkaline fluid. The hydrothermal fluid evolved with time to one rich in Si, B, and slightly acid pH, which produced the silicification and tourmalinization of the volcanic rocks occurring on the external alteration halo around the ores. The mineralogical and geochemical zones around the orebodies reflect thermal and compositional gradients in the hydrothermal fluids produced during the emplacement of the massive iron orebodies.

Key words: Iron, Hydrothermal alteration, Metasomatism, Geochemistry, Cretaceous iron belt, Cerro Negro Norte, Chile.

INTRODUCCION

La Franja Ferrífera Cretácica (FFC) se extiende en dirección norte-sur, a lo largo de la Cordillera de la Costa entre los paralelos 26°-31° S. Los yacimientos de esta provincia metalogénica constituyen la principal fuente de la producción de mineral de hierro del país. Los depósitos se emplazan mayoritariamente en rocas volcánicas asignadas a la Formación Bاندurrias (Segerstrom, 1968), las cuales junto a intrusivos asociados, son considerados como parte de un sistema arco magmático-cuenca trasarco, desarrollado en relación a un sistema de subducción activo durante el Cretácico Inferior (Aguirre, 1985).

Los yacimientos de hierro de la FFC son clasificados, en base a la paragénesis de la mena, como del tipo magnetita-apatita ('Tipo Kiruna'; Geijer, 1931). Su génesis ha sido relacionada a los eventos magmáticos de las rocas que los hospedan, sugiriéndose un origen netamente magmático (Geijer, 1931), o bien, un origen deutérico-hidrotermal (Ruiz, 1943). Trabajos más recientes han mostrado que este tipo de yacimientos, además, pueden ser fuente de otros elementos de interés económico, tales como V, Elementos de las Tierras Raras, Au, Cu, Co, Ag, U (Henríquez, 1978; Hitzman *et al.*, 1992; Rojas, 1993).

Característico de todos los yacimientos de la FFC, es su asociación con rocas afectadas por alteración hidrotermal, las cuales, generalmente, se mencionan

como zonas blanqueadas y silicificadas. Las rocas actinolitizadas que constituyen las rocas de caja de las menas, han sido interpretadas, principalmente, como rocas afectadas por metamorfismo de contacto (Ruiz *et al.*, 1965).

El distrito ferrífero Cerro Negro Norte (Fig. 1) forma parte de la FFC y constituye un buen ejemplo de los tipos de mena y alteraciones asociadas presentes a lo largo de esta provincia metalogénica. El distrito se encuentra actualmente abandonado, y estudios recientes realizados por la Compañía Minera del Pacífico (CMP) han demostrado la presencia de mineralización de oro asociada directamente con la mena de Fe y en las márgenes del distrito. Las rocas del distrito han sido afectadas por una intenso metasomatismo y alteración hidrotermal, las que presentan una zonación en torno a la mena de Fe. La zona interna, próxima a la mena, se caracteriza por una intensa actinolitización, seguida hacia afuera por rocas albitizadas, silicificadas, y en parte, afectadas por intensa turmalinización (Vivallo *et al.*, 1994a).

El presente trabajo tiene por objetivo caracterizar y discutir los cambios químicos que se producen en las rocas afectadas por la actividad hidrotermal desarrollada durante el emplazamiento de la mena de Fe en el distrito Cerro Negro Norte.

GEOLOGIA

El distrito ferrífero Cerro Negro Norte (Fig. 1) consiste en una serie de cuerpos macizos y diseminados de magnetita, distribuidos en una franja de aproximadamente 0,5x3 km y de orientación norte-sur. La roca de caja de la mineralización corresponde a andesita con distintos grados de alteración, la que presenta una disposición subhorizontal y ha sido intruída, tanto hacia el este como al oeste, por cuerpos plutónicos monzoníticos a granodioríticos.

LITOLOGIA

Las diferentes unidades litológicas diferenciadas en el distrito (Fig. 1), fueron identificadas sobre la base de sus relaciones de terreno características petrográficas y texturales macroscópicas y microscópicas. Las rocas de actinolita, que corresponden a rocas de color verde oscuro, de grano medio a grueso, se encuentran espacialmente restringidas a un halo de hasta varias centenas de metros alrededor de la mena de hierro. Hacia la parte externa, presentan un contacto gradacional con las rocas andesíticas y el contacto con la mena de hierro es caracterizado por la presencia de vetillas y diseminación de magnetita, las que disminuyen al alejarse de éste. Mineralógicamente, son dominadas por la presencia de actinolita y cantidades variables de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico. Epidota, clorita, titanita y magnetita son los minerales menores o accesorios más comunes. La actinolita está reemplazada, localmente, por la asociación epidota-titanita, o bien por clorita; localmente, el proceso de epidotización es importante. Vetillas de cuarzo±escapolita, actinolita de aspecto pegmatítico y cuarzo-turmalina, atraviesan a las rocas de actinolita.

Las rocas andesíticas se encuentran rodeando a las rocas de actinolita. En general, presentan un aspecto variable, dependiendo del grado y tipo de alteración que las afecta. Las partes mejor preservadas, se caracterizan por su color gris oscuro, textura porfídica, con fenocristales tabulares de plagioclasa, generalmente maclados, la masa fundamental, de grano muy fino, está dominada por la asociación feldespato-cuarzo-hornblenda, con cantidades menores de epidota y clorita. Con un aumento del cuarzo en la masa fundamental y en vetillas, la roca gradúa hacia una variedad con distintos grados de silicificación, la que puede ser acompañada por un aumento de la cantidad de albita, resultando entonces, una roca de cuarzo-albita o viceversa. Las rocas afectadas por albitización pueden presentar tanto un color blanquecino y textura 'aplítica' como un color rosado y textura equigranular de grano medio a grueso. Las rocas albitizadas de color rosado, constituyen una estrecha franja en el sector noreste del distrito, mientras que aquéllas de aspecto aplítico se distribuyen de manera irregular en su parte oeste y noroeste.

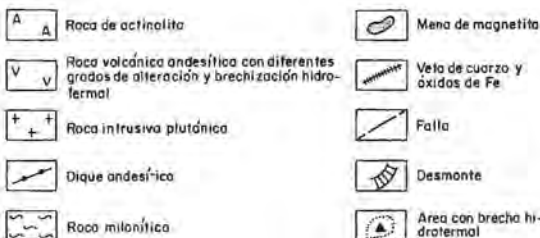
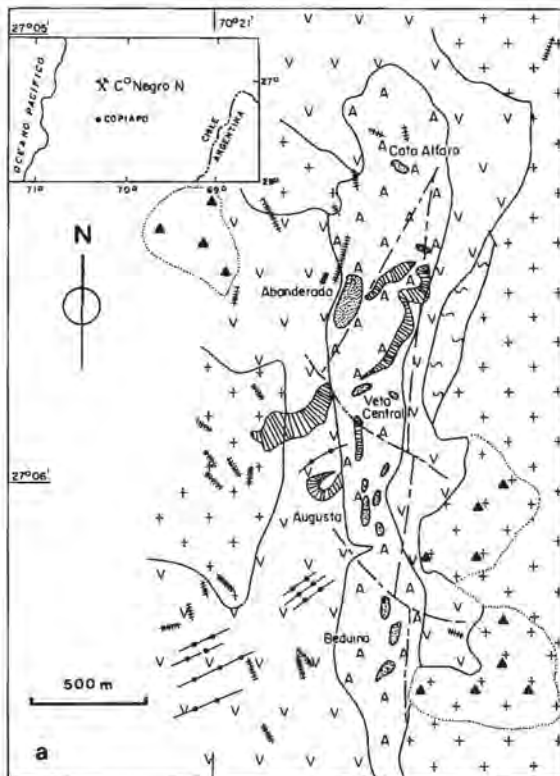


FIG. 1. Bosquejo geológico del distrito ferrífero Cerro Negro Norte. Modificado de S. Vicencio y H. Acosta (1985)¹.

¹ 1985. Evolución geológica del potencial aurífero en el distrito de hierro Cerro Negro Norte. (Inédito), Compañía Minera del Pacífico S. A., 27 p.

Las rocas andesíticas, además, están afectadas por turmalinización con o sin silicificación. En este caso, la turmalina se presenta tanto en vetillas como diseminada. En casos extremos, la mineralogía y textura original de la roca pueden estar totalmente destruidas, transformando a ésta en una roca de turmalina-cuarzo, de grano muy fino y con un característico color negro; ocasionalmente, puede contener granate. La turmalinización afecta a todas las rocas y menas del distrito pero es más intensa en su margen oriental.

Cuerpos de **brechas hidrotermales**, de tamaño y formas variables, se encuentran presentes en los bordes oriental y occidental del distrito. En la parte oriental del distrito, predominan las brechas de turmalina, las que espacialmente se asocian con rocas intrusivas félsicas, de textura porfídica. La brechización hidrotermal del lado occidental afecta, principalmente, a las rocas andesíticas, presentándose como zonas fuertemente brechizadas con fracturas rellenas con actinolita±turmalina?

Las rocas intrusivas plutónicas -de composición monzonítica a granodiorítica- afloran al este y oeste del distrito. Ellas corresponden a rocas equigranulares, de grano medio, y mineralógicamente muy similares entre sí. Ambas están conformadas por cantidades variables de plagioclasa, hornblenda, cuarzo, ±actinolita como minerales principales, siendo la clorita, epidota y titanita los minerales accesorios más comunes. La presencia de turmalina y biotita en el intrusivo del lado este (Intrusivo Este), representa la mayor diferencia mineralógica entre ambos cuerpos. El Intrusivo Este ha sido, en parte, afectado por deformación, la que se expresa como una limitada franja de milonita, de dirección norte-sur (Fig. 1).

Numerosos **diques andesíticos** cortan a toda la secuencia; en general, ellos son de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa±hornblenda, en una masa fundamental cuarzo-feldespática de grano fino, conteniendo, además, hornblenda, clorita, titanita, epidota. Diques aplíticos, subhorizontales y de escaso espesor (< 0,5 m) cortan a la mena de hierro y sus rocas de caja.

MINERALIZACIÓN

La mineralización consiste en cuerpos macizos y diseminados de magnetita, ubicados en la parte central del distrito y vetas de cuarzo con distintas

proporciones de magnetita, hematita, calcita, óxidos de cobre, que se ubican en su periferia, mayoritariamente en su sector occidental (Fig. 1). Estas vetas son en general, de escasa potencia (<0,5 m) y corrida (<100 m). Además, en el margen oriental, existen brechas de turmalina con mineralización diseminada de sulfuros (pirita>calcopirita), no económica en superficie.

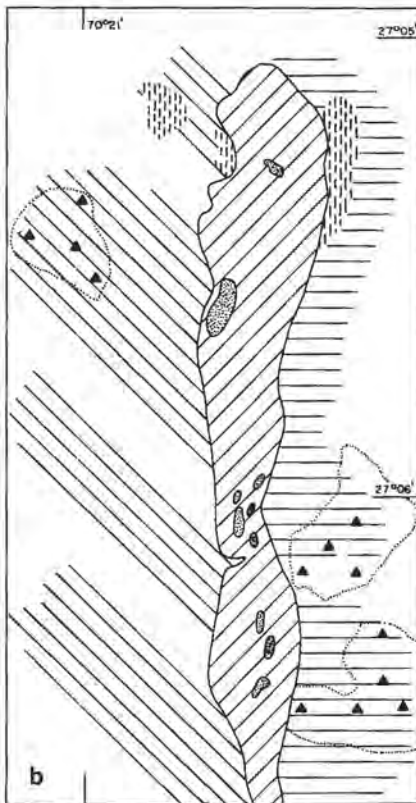
Basado en su modo de emplazamiento y características texturales, la mineralización de hierro ha sido dividida en cuatro tipos distintos (Vivallo *et al.*, 1993): **a- cuerpos macizos**, tabulares, verticales a subverticales, de un par de metros de espesor, comúnmente denominados vetas; **b- cuerpos macizos**, verticales a subverticales, de forma irregular y dimensiones variables, representados por el cuerpo en forma de domo, del sector Abanderada (Fig. 1) **c- cuerpos de mineralización diseminada** que generalmente, se presentan rodeando a la parte maciza de la mena y con una extensión variable. Corresponde a un sector donde la roca de actinolita ha sido brechizada por vetillas de magnetita y, en parte, reemplazada por magnetita (diseminación); **d- cuerpos macizos subhorizontales**, de un par de metros de espesor, formas y extensiones variables y contactos nítidos con la roca de caja. Se pueden presentar interestratificados con las rocas volcánicas (e.g., sector Veta Central, Fig. 1), y contener intercalaciones centimétricas de dolomita finamente bandeada, y con textura coliforme. Sobre la base de las relaciones de terreno, geoquímica de la mena y texturas y estructuras observadas en los depósitos macizos, éstos han sido interpretados como representando cuerpos intrusivos y extrusivos de magnetita (Vivallo *et al.*, 1993).

Sobre la base de la distribución espacial de los distintos tipos litológicos, relaciones de contacto entre las distintas unidades y relaciones temporales representadas por los distintos tipos de vetillas, se ha establecido que las rocas hidrotermalmente alteradas del distrito Cerro Negro Norte, presentan una marcada zonación con respecto a la mena de hierro, con una zona interna actinolitizada que la rodea, y sucedida hacia afuera por una zona con distintos grados de silicificación y turmalinización (Fig. 2). La presencia de zonas con fuerte albitización, incluidas en el halo exterior silicificado, sugiere la acción de un proceso de albitización, probablemente contemporáneo con la actinolitización, y que antecede a la silicificación y turmalinización (Vivallo *et al.*, 1994a).

GEOQUIMICA

Los contenidos de elementos mayores, menores y trazas de 35 muestras de roca, representativas de todas las unidades litológicas (Tabla 1), fueron analizados en los laboratorios de X-Ral en Ontario, Canadá, utilizando una combinación de métodos que incluyen fluorescencia de rayos X (elementos mayores y

menores, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Cl), volumetría con horno de inducción LECO para S, espectrometría de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado (ICP) (Co, Ni, Cu, Zn) y plasma de corriente continua (DCP) (B, V), activación neutrónica (Tierras Raras, Hf, U, Th, Au) y vía húmeda para el flúor (F).



- Zona de actinolitización
- Zona de albificación
- Zona de silicificación-furmalinización
- Zona con distintos grados de silicificación ± furmalina ± actinolita
- Área con brecha hidrotermal
- Mena de magnetita

FIG. 2. Distribución esquemática de las distintas zonas de alteración del distrito Cerro Negro Norte.

TABLA 1. COMPOSICION QUIMICA DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE LAS DISTINTAS UNIDADES LITOLÓGICAS DEL DISTRITO CERRO NEGRO NORTE, COPIAPO.

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	63,30	56,00	71,60	60,40	53,30	66,10	57,60
Al ₂ O ₃	14,80	16,70	14,30	17,90	6,20	17,20	17,90
CaO	6,52	8,72	2,03	6,86	11,20	1,87	0,96
MGO	3,69	3,53	0,70	2,70	14,80	2,35	5,76
Na ₂ O	4,76	7,01	3,93	5,78	1,66	8,84	1,42
K ₂ O	0,44	0,42	3,70	0,44	0,18	0,29	0,14
Fe ₂ O ₃	4,40	2,38	2,32	2,34	9,89	1,37	6,62
MnO	0,05	0,05	0,06	0,05	0,09	0,02	0,01
TiO ₂	0,53	1,07	0,32	0,89	0,93	0,86	1,10
P ₂ O ₅	0,04	0,30	0,08	0,14	0,15	0,06	0,06
LOI	0,93	3,62	0,85	1,00	1,62	1,08	2,47
Total	99,60	99,90	100,10	98,60	100,00	100,30	94,10
Rb	16	26	152	<10	12	10	13
Sr	426	466	249	600	64	17	157
Y	43	30	<10	23	<10	13	22
Zr	274	239	466	144	62	384	429
Nb	11	29	<10	11	37	32	27
Ba	146	49	689	154	17	104	115
B	20	30	111	14	15	1580	22600
F	110	180	180	94	870	210	560
S	500	200	300	200	100	200	500
Cl	946	304	428	1130	721	506	183
Sc	16	22	4	21	32,7	16	34
V	71	194	28	156	354	127	370
Cr	14	13	3	18	86	4	12
Ni	3	11	<1	6	26	9	1
Cu	32	25	26	22	61	9	35
Zn	13	50	29	21	6	14	2
As	2	7	6	3	<1	1	1
La	8,9	10,8	18,5	6,4	1,9	1,9	2,7
Ce	20	26	31	16	7	6	5
Nd	11	15	12	10	5	<5	<5
Sm	2,8	4,1	2,4	2,8	2,3	1,8	0,6
Eu	0,8	1,3	0,7	1	0,6	0,7	0,4
Tb	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Yb	3	2,3	1,4	2,4	2,7	1,5	1,2
Lu	0,49	0,4	0,25	0,37	0,49	0,36	0,21
Hf	6	6	10	5	1	8	5
Th	5	6	16	3	3	6	<1
U	1,2	2,6	3	1	1	3,1	0,7
Au	0,7	44	0,3	1,3	9	3	52

LOI: pérdida por calcinación; Fe total como Fe₂O₃.
 Elementos mayores: % peso; elementos en trazas: ppm; oro: ppb.
 Muestra 1- andesita; 2- dique diorítico; 3- Intrusivo Este; 4- Intrusivo Oeste; 5- roca de actinolita; 6- roca de albita-cuarzo; 7- roca de cuarzo-turmalina.

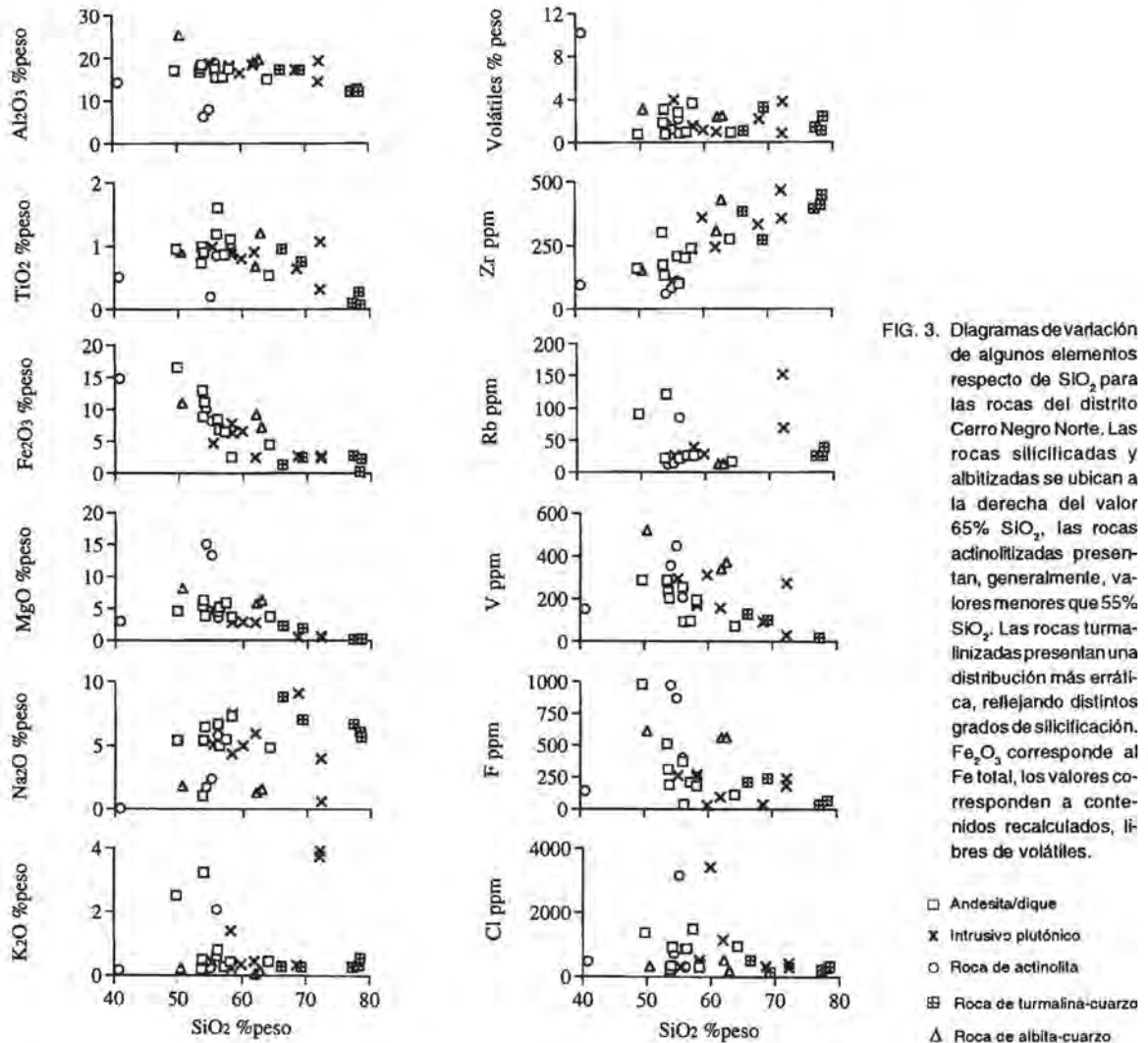


FIG. 3. Diagramas de variación de algunos elementos respecto de SiO_2 para las rocas del distrito Cerro Negro Norte. Las rocas silicificadas y albitizadas se ubican a la derecha del valor 65% SiO_2 , las rocas actinolizadas presentan, generalmente, valores menores que 55% SiO_2 . Las rocas turmalinizadas presentan una distribución más errática, reflejando distintos grados de silicificación. Fe_2O_3 corresponde al Fe total, los valores corresponden a contenidos recalculados, libras de volátiles.

Considerando el conjunto de las rocas volcánicas del distrito, éstas presentan un predominio de las composiciones intermedias (Fig. 3). El contenido de sílice en las rocas menos alteradas se sitúa mayoritariamente, en el intervalo composicional de la andesita. Los valores extremos corresponden a muestras con fuerte silicificación o rocas de actinolita. Los contenidos de Al_2O_3 y TiO_2 de las muestras menos alteradas son compatibles con la composición predominantemente intermedia de las rocas volcánicas del área. El Zr muestra un amplio intervalo de variación entre 50 y 400 ppm, mostrando una moderada correlación lineal positiva con el contenido de SiO_2 de las distintas unidades litológicas definidas sobre la base de criterios petrográficos. Otra característica de las

rocas del distrito se aprecia al observar los valores del Na_2O y K_2O (Fig. 3), destacando el bajo contenido de K_2O en la mayoría de las rocas y la abundancia de valores altos en Na_2O , incluso en las rocas consideradas con un grado de alteración menor.

Al estudiar la covariación de los distintos elementos mayores (expresados en forma de óxidos) y trazas en relación al SiO_2 , se aprecian en éstos, tres tendencias principales, a- elementos que tienden a permanecer constantes con la variación en el contenido de SiO_2 (e.g., Al_2O_3 y TiO_2); b- elementos que muestran una buena correlación con SiO_2 (e.g., Fe_2O_3 total, MgO, Zr, Hf, V), y c- elementos que se caracterizan por una gran dispersión en estos diagramas. Además, las distintas unidades litológicas mues-

tran una marcada tendencia a ocupar sectores bien definidos en estos diagramas (Fig. 3); en ellos, las rocas andesíticas mejor preservadas se ubican ocupando un sector central (55-60% SiO₂) junto con los diques y rocas intrusivas. Las rocas de cuarzo±albita se ubican a la derecha de este campo, mientras que las rocas de actinolita lo hacen a su izquierda (SiO₂<55%). Las rocas turmalinizadas presentan una distribución irregular, según su grado de silicificación.

PATRONES NORMALIZADOS DE LOS ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS

En general, todas las unidades litológicas diferenciadas en terreno, están caracterizadas por patrones normalizados de los Elementos de Tierras Raras de pendiente muy suave, con razones La/Yb bajas. Las rocas andesíticas menos alteradas presentan patrones muy parecidos y casi paralelos a los observados en los diques y en el Intrusivo Oeste, aunque el contenido total de Tierras Raras es más alto en este último (Fig. 4). El Intrusivo Este presenta un patrón ligeramente más diferenciado que los anteriores. Con la sola excepción de una muestra fuertemente epidotizada, todas las rocas de actinolita presentan un patrón aproximadamente horizontal a ligeramente empobrecido en Tierras Raras Livianas (La/Yb<1; Fig. 4), con contenidos totales muy similares a los de las andesitas. Las rocas afectadas por albitización y silicificación muestran dos tendencias, la primera caracterizada por un patrón enriquecido en Tierras Raras Livianas con respecto de las Pesadas (La/Yb>1) y la segunda presenta un empobrecimiento relativo del contenido de Tierras Raras Livianas (La/Yb<1) (Fig. 4). Todas las rocas afectadas por turmalinización presentan un ligero enriquecimiento relativo de las Tierras Raras Livianas (Fig. 4).

CAMBIOS EN LA COMPOSICION QUIMICA DE LAS ROCAS ALTERADAS

Al comparar las composiciones promedios de las distintas unidades litológicas con la composición promedio de las rocas andesíticas menos alteradas, se observa que los contenidos de elementos mayores en los diques (Fig. 5a) se aproximan bastante a la composición media de las andesitas. Las únicas diferencias son una pequeña deficiencia en los contenidos de Ca y Fe, y enriquecimiento en álcali en los diques con respecto de la andesita. Sin embargo, los

diques son mucho más ricos en P y elementos volátiles (LOI: mayoritariamente H₂O y CO₂) que la andesita. La mayor diferencia en los contenidos de elementos en trazas radica en los contenidos relativamente más altos de B, V, Au, U, y en los bajos contenidos de Cl, Cu, Zn en los diques con relación a la andesita.

Las rocas de actinolita se encuentran principalmente enriquecidas, con respecto a la andesita, en Ca, Mg, Fe, Mn, P, LOI, B, F, V, Au y empobrecidas en álcalis, Ti, Sr, Zr, Cu, Zn y Hf. Al comparar una muestra con mineralización disseminada de Fe con la andesita, se mantienen algunas de las características de las rocas de actinolita, pero en este caso se observa un empobrecimiento general de los elementos mayores desde Si hasta K (Fig.5a), desapareciendo fuertemente el enriquecimiento en LOI, pero manteniendo valores positivos para el B y F. Esta muestra indica, además, un enriquecimiento moderado de S y fuerte enriquecimiento de Au y Cu en la mena con respecto a la andesita, mientras que el Zn presenta un valor muy bajo.

Las rocas de albita-cuarzo muestran un empobrecimiento general en casi todos los elementos mayores y gran parte de los elementos en trazas (Fig. 5a), al comparar su composición promedio con aquella correspondiente a la de la andesita. Especialmente marcado, es el déficit de Ca y Mg; los elementos más enriquecidos corresponden a Zr, S, Au y Zn. El contenido promedio de Na en las andesitas es casi idéntico al de las rocas albitizadas.

Las rocas de turmalina-cuarzo, por su parte, están caracterizadas por un alto contenido de B (Fig. 5b) y contenidos de Si, Al, Mg, Fe, F, Sc, Hf y U muy similares a la roca andesítica. Además del B, solamente los volátiles (LOI), Zr, S, V y As se presentan enriquecidos en las rocas turmalinizadas. Las mayores deficiencias corresponden a Ca, K, Cl, Cr, Ni, Cu, Zn y Th. Una muestra de la brecha de turmalina hospedada en un intrusivo félsico (Fig. 5b), presenta un patrón muy similar al de las rocas de turmalina-cuarzo, constituyendo su enriquecimiento relativo en Mg, Na, Fe, Au, Ni, Cu, y deficiencia en S las diferencias más importantes entre ambas litologías afectadas por la turmalinización.

Al comparar las composiciones químicas de los intrusivos Este y Oeste (Fig. 5b), se aprecia que el Intrusivo Este es fuertemente deficiente en Ca, Mg, Na, Sr, Cl y Ni, pero enriquecido en K, Rb, B, S y Au con respecto a la composición del Intrusivo Oeste. El

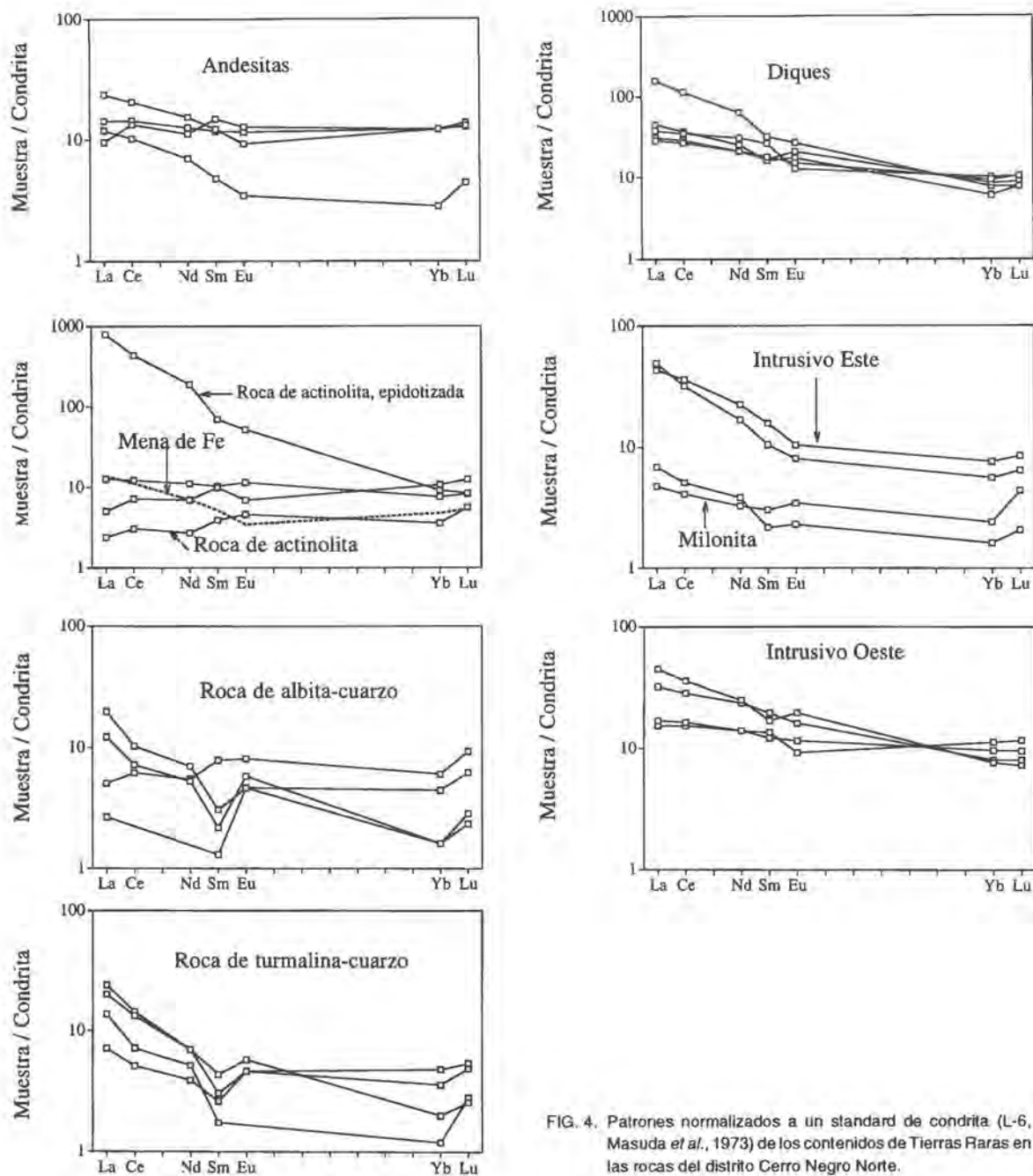


FIG. 4. Patrones normalizados a un standard de condrita (L-6, Masuda *et al.*, 1973) de los contenidos de Tierras Raras en las rocas del distrito Cerro Negro Norte.

proceso de milonitización, que afecta a parte del Intrusivo Este (Fig. 1) origina una disminución en el contenido en la mayor parte de los componentes del protolito, solamente el B y el Ni presentan un aumento significativo (Fig. 5b).

HALOS GEOQUIMICOS EN TORNO DE LA MENA DE HIERRO

Al igual que la zonación mineralógica, y como un reflejo de ésta, los distintos elementos constituyentes

de las rocas volcánicas andesíticas y sus equivalentes alterados presentan, a nivel de distrito, una marcada zonación con respecto de la mena de hierro (Fig. 6). La zona interna actinolitizada, próxima a la mena, está caracterizada principalmente por una clara disminución de SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , S, e incremento de CaO, MgO, Fe_2O_3 , MnO, P_2O_5 , F, Cl, V, Au, Cr y Ni. Otros elementos presentan un comportamiento mucho más variable; B, U y Th presentan zonas con altos con-

tenidos en franjas adyacentes a las rocas actinolitizadas.

Un halo de alteración desarrollado en torno a una veta de cuarzo-óxido de Fe, alojada en el Intrusivo Este, está caracterizado por un fuerte incremento de CaO, MgO, Na_2O , Volátiles (LOI), Cr y Ni, acompañado por fuertes pérdidas de K_2O , Zr, Ba, B, S, Au, Cu, Zn (Fig. 5b).

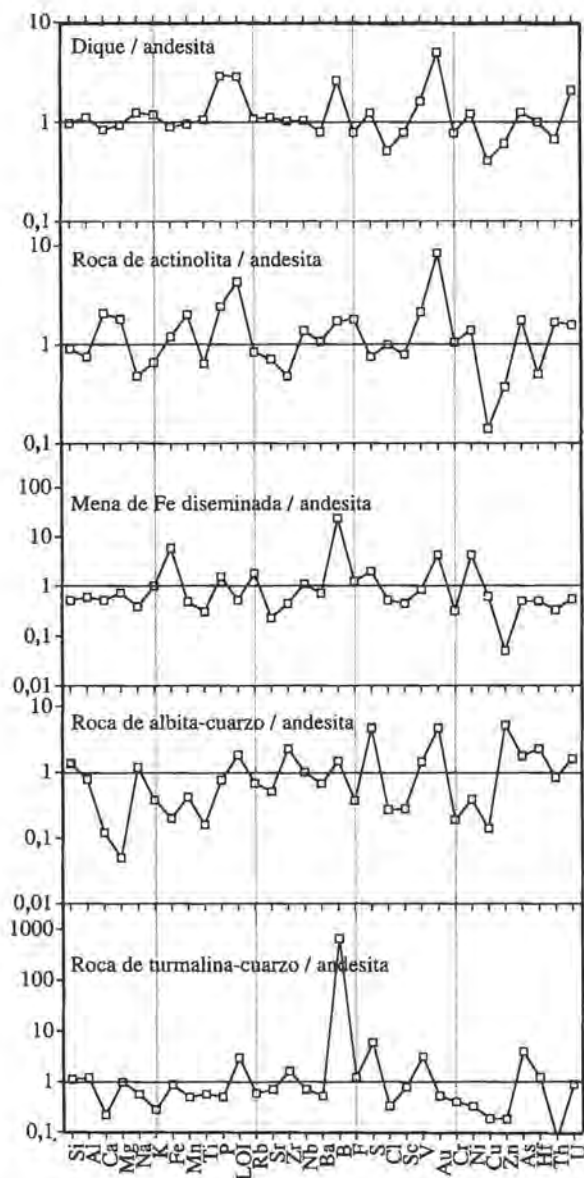


FIG. 5a. Comparación de las composiciones químicas promedio de las distintas unidades litológicas con la composición promedio de las rocas andesíticas menos alteradas.

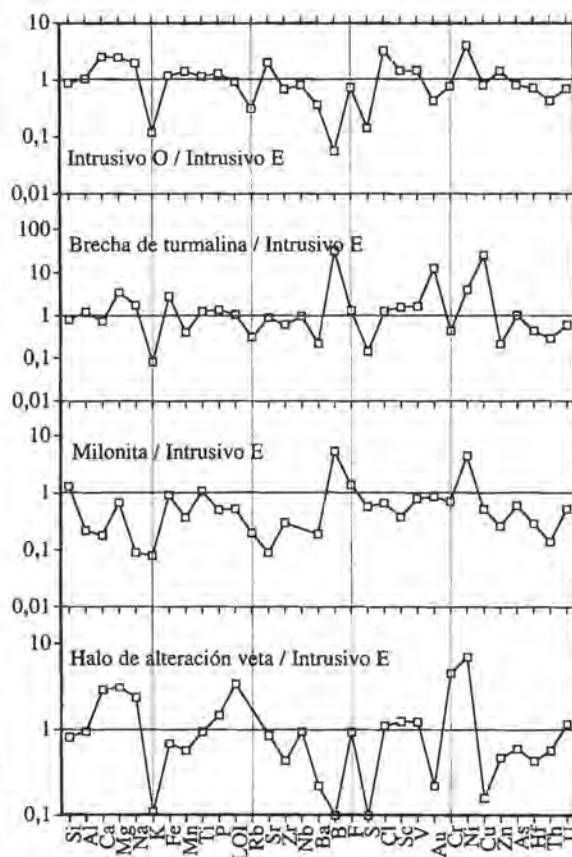


FIG. 5b. Comparación de las composiciones químicas promedio del Intrusivo Oeste, brecha de turmalina en Intrusivo télsico, Intrusivo Este milonitizado y halo de alteración de veta de cuarzo-óxido de hierro emplazada en el Intrusivo Este, con la composición promedio del Intrusivo Este.

DISCUSION

ORIGEN DE LAS ROCAS ALTERADAS Y MOVILIDAD DE LOS ELEMENTOS

Las evidencias petrográficas, tales como la presencia de relictos de rocas volcánicas preservadas dentro de las distintas zonas de alteración y los cambios graduales observados entre las distintas unidades litológicas, indican que las rocas no intrusivas del distrito tienen un origen volcánico común, y una composición principalmente andesítica. Este origen común es también avalado por la similitud de sus patrones de los Elementos de las Tierras Raras (Fig. 4) y el comportamiento de Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 y MgO en los diagramas de variación (Fig. 3). El hecho de que los diques presenten algún grado de alteración, reflejado principalmente en los altos valores de los contenidos de volátiles (LOI), sugiere la posibilidad

que este evento de alteración pudiera ser el mismo o estar relacionado con aquel que afecta a las rocas volcánicas, lo cual implica una formación casi simultánea de ambos tipos de roca. Por otra parte, las similitudes en el comportamiento de las rocas intrusivas y volcánicas en los diagramas de variación (Fig. 3) y patrones normalizados de los Elementos de las Tierras Raras (Fig. 4) sugieren la idea de su consanguineidad, en cuyo caso las rocas andesíticas y el Intrusivo Este representarían los componentes de menor y mayor grado de diferenciación, respectivamente. Sin embargo, la falta de dataciones radiométricas impiden corroborar esta hipótesis. Razones $Sr(i)$ para rocas volcánicas andesíticas y granitoides del segmento de la Cordillera de la Costa comprendido entre los 26° y $29^\circ S$, presentadas por McNutt *et al.* (1975), sugieren que ambas litologías se formaron a partir de material derivado del manto. Tal origen es consistente con los patrones de Tierras Raras relativamente horizontales presentados por las rocas volcánicas en el distrito.

Comúnmente, en rocas ígneas no alteradas, el contenido de SiO_2 representa un índice de su grado de diferenciación magmática. Basado en las composiciones químicas de las rocas alteradas y en aquellos diagramas de variación (Fig. 3) donde se observa una buena correlación de los distintos componentes con el contenido de SiO_2 (e.g., Zr , Fe_2O_3 , MgO), se podría postular que las rocas del distrito presentan una variación composicional desde andesita a riolita, describiendo aparentemente un 'trend' de evolución magmática continuo. Sin embargo, la gran dispersión y baja correlación con SiO_2 presentada por muchos de los elementos en estos diagramas, como por ejemplo los álcalis y el Sr , indican que la composición química de todas las rocas ha sido afectada, con posterioridad a su emplazamiento, por procesos de alteración. Las evidencias petrográficas indican que las rocas del distrito han sido afectadas, principalmente, por procesos de actinolitización, silicificación, albitización y turmalinización, los que fundamentalmente se reflejan en pérdidas y ganancias de sus distintos componentes con respecto a la composición de las rocas menos alteradas en el distrito (Figs. 5a y 5b). En consecuencia, la mayoría de los elementos, mayores y en trazas, han sido modificados en sus contenidos originales generando, en algunos casos,

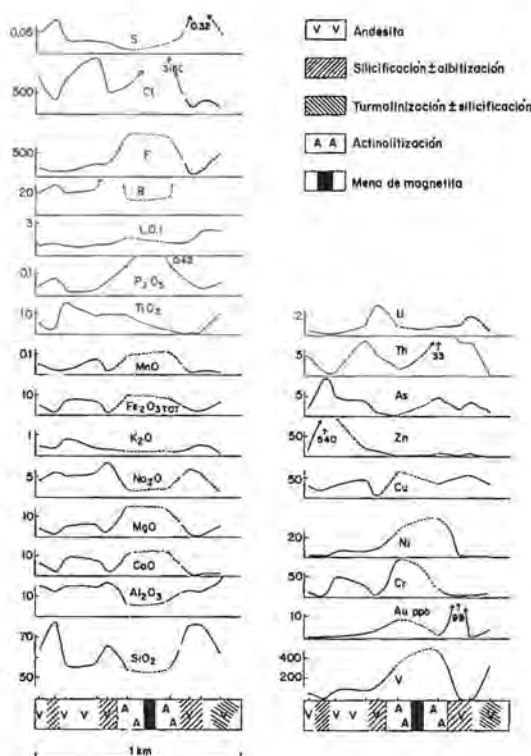


FIG. 6. Perfil esquemático mostrando la distribución de las rocas volcánicas alteradas y los halos geoquímicos en torno a las menas de hierro del distrito. Basado en muestras puntuales de las distintas unidades de rocas volcánicas alteradas y no alteradas.

'trends' de alteración, que se superponen a la evolución magmática (Fig. 3) y que podrían ser confundidos con ella.

Como se desprende de su comportamiento en los diagramas de variación (Fig. 3), los elementos más refractarios durante los procesos de alteración corresponden, en este caso, a Al_2O_3 y TiO_2 . Ellos se presentan relativamente insensibles a los cambios en los contenidos de SiO_2 , manteniendo el primero un valor casi constante alrededor del 17% en peso y fluctuando entre 0,8-1,2% en peso el TiO_2 . Solamente en aquellos casos en que la litología original ha sido afectada por una fuerte silicificación, dichos elementos presentan un comportamiento móvil. Elementos normalmente considerados muy poco sensibles a la alteración, como por ejemplo el Zr (Pearce y Cann, 1973), muestran también grandes variaciones (Figs. 3, 5a y 7), sugiriendo un comportamiento móvil.

Debido al comportamiento móvil de la mayor parte de los distintos elementos de las rocas durante los procesos de alteración, el contenido de SiO_2 refleja, fundamentalmente, el proceso de alteración que afectó a las rocas del distrito. En ese sentido y en este caso específico, el SiO_2 debería ser considerado un índice de alteración. Una buena correlación con SiO_2 (Fig. 3) sugiere entonces, movilidad de dicho elemento durante los procesos de alteración que implican algún grado de silicificación. En este contexto, la movilidad del Zr durante los procesos de alteración, se puede apreciar claramente al estudiar su covariación con SiO_2 (Fig. 3). La alta correlación observada entre Zr y Hf (Fig. 7) refleja, probablemente, un comportamiento similar y presencia de ambos elementos en los mismos minerales. En este diagrama (Fig. 7), las rocas andesíticas menos alteradas junto a los diques e intrusivos se ubican en un tramo intermedio limitado por los valores de Zr 100-300 ppm; hacia la izquierda, se ubican las rocas actinolíticas y hacia su derecha, aquéllas afectadas por procesos de silicificación ± albitización, confirmando la movilidad del Zr durante los procesos de alteración,

ZONACION DE LA ALTERACION Y COMPOSICION DEL FLUIDO HIDROTHERMAL

La actividad hidrotermal que afectó a las rocas de caja de la mineralización de hierro originó una marcada zonación mineralógica y geoquímica en torno a la mena (Figs. 2 y 6). Extensas zonas con rocas alteradas hidrotermalmente han sido descritas para

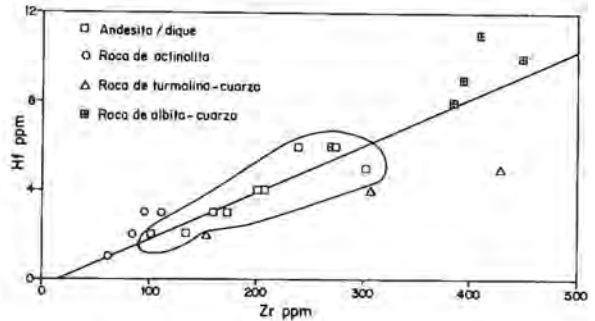


FIG. 7. Covariación de Hf-Zr en diques y rocas volcánicas alteradas y no alteradas del distrito Cerro Negro Norte. La línea representa el 'trend' de diferenciación magmática para andesitas y diques.

otros yacimientos del tipo magnetita-apatita (Ruiz *et al.*, 1965; Galatzan, 1978; Bookstrom, 1977; Espinoza, 1984; González, 1990; Hitzman *et al.*, 1992, Travisany *et al.*, en prensa). Los tipos más frecuentes de alteración corresponden a albitización, alteración potásica, y alteración sericitica o cuarzo-sericitica y en el caso de los yacimientos de la FFC, la actinolitización próxima a la mena constituye la característica más peculiar. Hitzman *et al.* (1992) sugieren que la composición mineralógica y química de dichas zonas es función de la composición de la roca de caja y del nivel de emplazamiento con respecto a la paleosuperficie de la mineralización. En este esquema, los niveles más profundos corresponden a zonas albitizadas o con alteración potásica y los más superficiales a zonas con alteración cuarzo-sericitica. En el distrito Cerro Negro Norte, el patrón de alteración difiere del anteriormente mencionado, y consiste en una disposición relativamente simétrica de las distintas zonas de alteración con respecto a los cuerpos de mena. Ello parece reflejar, más que distintos niveles de erosión, gradientes de temperatura y composición de los fluidos hidrotermales a partir del lugar de emplazamiento de los cuerpos macizos de magnetita.

La superposición de eventos de alteración, indicada por la superposición de distintos tipos de vetillas y por la presencia de relictos de rocas fuertemente albitizadas dentro de la zona externa silicificada, reflejan la evolución compleja de un sistema hidrotermal de grandes dimensiones. Una evolución compleja de los eventos de alteración hidrotermal y metamorfismo relacionados a la génesis de los yacimientos de hierro de la FFC, ha sido señalada anteriormente por Galatzan (1978) y González (1990),

quienes sugirieron que la alteración asociada a estos depósitos es el resultado de una superposición de eventos que incluyen, metamorfismo regional y de contacto, alteración hidrotermal, metamorfismo dinámico y alteración supérgena. En general, todos los tipos de alteración presentes en el distrito ferrífero Cerro Negro Norte, se encuentran también presentes en los otros distritos de la FFC, aunque en algunos casos con geometrías diferentes (cf. Espinoza, 1984 y referencias allí citadas).

Los cambios mineralógicos y de composición química asociados a los distintos tipos de alteración, junto con las relaciones espaciales y temporales de las diferentes unidades de rocas alteradas, sugieren que los fluidos involucrados en el proceso de emplazamiento de la mineralización de Fe, fueron capaces de alterar hidrotermalmente a las rocas circundantes. Estas soluciones se caracterizaron por un alto contenido inicial de Ca, Mg, Fe, P, F, CO₂, Cl, Na y serían las responsables de los halos de roca actinolitizada y albitizada que rodea a la mena de hierro. La presencia de plagioclasa ('albita') y feldespato potásico, coexistiendo con actinolita en las rocas alteradas y el predominio de albita en las zonas de fuerte albitización, son compatibles con un pH ligeramente alcalino o próximo al neutro, de las soluciones hidrotermales (cf. Rose y Burt, 1979; Seward, 1984). La extensión e intensidad de la alteración, especialmente en las rocas fuertemente albitizadas y actinolitizadas, sugieren un alto valor de la razón fluido/roca. Esta primera etapa del proceso de alteración, probablemente, finalizó con un evento de más baja temperatura durante el cual se depositó dolomita±sílice, representada, principalmente, por los depósitos bandedados asociados a los cuerpos interpretados como flujos de lavas de magnetita. Soluciones ricas en cloro permitirían explicar las más altas concentraciones de oro observadas hacia los bordes de los cuerpos macizos de magnetita en las rocas anfibi-

lizadas, zonas con mineralización diseminada y rocas albitizadas (Seward, 1984), las que representan zonas afectadas por una intensa actividad hidrotermal (Vivallo *et al.*, 1994b). Un alto contenido de CO₂, Cl, F y P en el fluido favoreció la movilidad selectiva de las Tierras Raras observada en las distintas unidades de rocas alteradas, dada la capacidad de estos componentes para formar complejos con los elementos de las Tierras Raras (Humphris, 1984).

Este primer período de actividad hidrotermal fue sucedido por otro, rico en sílice, B y, probablemente, Cl. Rocas afectadas por intensa silicificación±turmalinización presentan el feldespato alterado a sericita, lo cual sugiere soluciones de un pH ligeramente ácido (cf. Rose y Burt, 1979). Desde el punto de vista metalogénico, este proceso origina una remoción en la roca alterada de la mayor parte de los elementos metálicos con Cr, Ni, Cu y Zn, pero puede originar en ella una concentración del oro junto con el depósito de fases sulfuradas (Fig. 5a).

Estudios preliminares de inclusiones fluidas (M. A. Skewes, 1991)¹, indican la presencia de dos tipos de inclusiones en el distrito. El primero corresponde a inclusiones de alta temperatura (>450°C), alta salinidad y sin evidencias de ebullición y uno posterior de más baja temperatura, rico en fase gaseosa y salinidad moderada, ambos de composición compleja. La coexistencia de estos dos tipos de inclusiones fluidas es compatible con las evidencias mineralógicas de las rocas hidrotermalmente alteradas, que sugieren la presencia de, a lo menos, dos tipos de fluidos involucrados en la génesis de las menas de hierro. El primer evento de alteración, responsable de la actinolitización, permite la coexistencia de plagioclasa-actinolita en presencia de magnetita sugiriendo condiciones de alta temperatura (>500°C) (Liou *et al.*, 1974). Al segundo evento se asociaría el proceso de turmalinización-silicificación, de más baja temperatura y con evidencias de ebullición.

CONCLUSIONES

El emplazamiento de la mineralización de hierro en el distrito Cerro Negro Norte fue acompañado por un intenso proceso de alteración hidrotermal que generó una aureola de rocas alteradas en torno a la mena. Desde la parte más interna y hacia sus bordes, esta aureola consiste en rocas actinolitizadas, rocas

albitizadas+silicificadas, y finalmente, rocas turmalinizadas±silicificadas, esta última zona se superpone a las dos anteriores. Este patrón de alteración, que se describe por primera vez para los yacimientos de hierro de la FFC, difiere en parte de aquél descrito para otros yacimientos del tipo de magnetita-apatita

¹ 1991. Análisis de inclusiones fluidas en cuarzo de cuerpos silíceos asociados a yacimientos de hierro (Inédito), *Compañía Minera del Pacífico*, 22 p.

(Vivallo *et al.*, 1991; Nyström y Henríquez, 1994; Lyons, 1988; Hitzman *et al.*, 1992) por la abundancia de rocas actinolizadas y presencia de rocas afectadas por distintos grados de turmalinización.

Relaciones de terreno, como por ejemplo, cambios graduales entre las distintas litologías, y similitudes en sus composiciones químicas son compatibles con un protolito andesítico común a todas las rocas alteradas del distrito.

Desde el punto de vista de su composición química y suponiendo un protolito andesítico, las rocas actinolizadas son el resultado de un intenso aporte metasomático de Ca, Mg, Fe, P, B, F, V, Au y empobrecimiento en álcalis, Ti, Sr, Zr, Cu, Zn y Hf. Las rocas albitizadas muestran un empobrecimiento en casi todos los elementos mayores y gran parte de los elementos en trazas, destacando el marcado déficit de Ca y Mg; solamente Zr, S, V, Au y Zn, entre los elementos en trazas, muestran un enriquecimiento significativo. Las rocas turmalinizadas se caracterizan por un enriquecimiento muy alto en B y moderado

de Zr, F, S, V y As; los elementos más empobrecidos corresponden a Ca, Rb, Cl, Cr, Ni, Cu y Zn. Las Tierras Raras muestran, en todas las rocas alteradas, un comportamiento móvil, siendo selectivamente removidas de las distintas zonas de alteración.

Los cambios químicos observados en las rocas alteradas y sus relaciones espaciales y temporales, son compatibles con un fluido hidrotermal caracterizado, inicialmente, por altos contenidos de Ca, Mg, Fe, Na, P, F, CO₂, Cl, y un pH neutro a ligeramente alcalino, revelado por la presencia de feldespato en las rocas actinolizadas. El fluido evoluciona posteriormente hacia uno rico en sílice y caracterizado por altos contenidos de B, responsable del proceso de silicificación y turmalinización.

La zonación mineralógica y geoquímica observada en torno a la mena de hierro del distrito de Cerro Negro Norte, refleja, principalmente, gradientes composicionales y de temperatura en los fluidos hidrotermales generados durante el emplazamiento de los cuerpos macizos de magnetita.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los Grants FONDECYT No. 91-1218, SAREC No. 89-101 (Swedish Agency for Research Cooperation with Developing Countries) y DICYTUSACH No. 05-092-15HB. Los autores agradecen las facilidades otorgadas por los Departamentos de Geología de la Universidad de Chile, Ciencias Geológicas de la Universidad Católica del Norte, Ingeniería de Minas de la Universidad de

Santiago de Chile, como así también las facilidades y apoyo otorgados por la Compañía Minera del Pacífico (CMP). J.O. Nyström (Swedish Museum of Natural History), J. Oyarzún (Universidad de La Serena), V. Maksaeu, (Cambior, Chile) revisaron críticamente el manuscrito sugiriendo modificaciones que contribuyeron a mejorar su presentación. Las figuras 1, 2 y 6 fueron realizadas por J. Oliva.

REFERENCIAS

- Aguirre, L. 1985. The Southern Andes. In *Ocean Basins and Trenches* (Naim, A.E. M.; Stehli, F.G.; Uyeda, S.; editors). *The Pacific Ocean Plenum Press*, Vol. 7A, p. 265-376. New York.
- Bookstrom, A. A. 1977. The magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology*, Vol. 72, p. 1101-1130.
- Galatzan, R. 1978. Geología y alteración en la mina de hierro Cerro Negro-Cristales, III Región. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 129 p.
- Geijer, P. 1931. The iron ores of the Kiruna type. Geographical distribution, geological character, and origin. *Sveriges Geologiska Undersökning*, Serie C 367, 39 p.
- González, E. 1990. Geoquímica de las rocas de caja y de los cuerpos mineralizados del yacimiento Algarrobo, III Región. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 121 p.
- Espinoza, S. 1984. Le rôle du volcanisme du Crétacé inférieur dans la métallogénèse de la Ceinture Ferrifère d'Atacama-Coquimbo, Chili. Tesis de Doctorado (Inédito), *L'Université Pierre et Marie Curie*, 153 p. Francia.
- Henríquez, F. 1978. Posibilidades de subproducto en la Minería del Hierro en Chile. *Revista Geológica de Chile*, No.6, p. 53-57.

- Hitzman, M.W.; Oreskes, N.; Einaudi, M.T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, Vol. 58, p. 241-287.
- Humphris, S.E. 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In *Rare Earth Element Geochemistry* (Henderson, P.; editor). Elsevier, p. 317-342. Amsterdam.
- Liou, J. B.; Kunioshi, S.; Ito, K. 1974. Experimental studies of the phase relations between greenschist and amphibolite in a basaltic system. *American Journal of Science*, Vol. 274, p. 613-632.
- Lyons, J. I. 1988. Volcanogenic iron oxide deposits, Cerro de Mercado and vicinity, Durango, Mexico. *Economic Geology*, Vol. 83, p. 1886-1906.
- Masuda, A.; Nakamura, N.; Tanaka, K. 1973. Fine structure of mutually normalized rare earth patterns of Chondrites. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, Vol. 37, p. 239-248.
- McNutt, R.H.; Crocket, J.H.; Clark, A.H.; Caelles, J.C.; Farrar, E.; Haynes, S.J.; Zentilli, M. 1975. Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic and volcanic rocks of the Central Andes between latitudes 26° and 29°S . *Earth and Planetary Sciences Letters*, Vol. 27, p. 305-313.
- Nyström, J. O.; Henríquez, F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology*, Vol. 89, p. 820-839.
- Pearce, J.A.; Cann, J.R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 19, p. 290-300.
- Rojas, M. 1993. Contenido y distribución de las Tierras Raras en apatitas del yacimiento de hierro El Algarrobo, III Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile*, 192 p.
- Rose, A. W.; Burt, D. M. 1979. Hydrothermal Alteration. In *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (Barnes, H. L.; editor). *John Wiley & Sons*, Second edition, p. 173-235. New York.
- Ruiz, C., 1943. Los yacimientos de hierro de la región noroccidental de Copiapó, un tipo no descrito de yacimientos de contacto metamórfico. *Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería*, No. 552, p. 820-857.
- Ruiz, C.; Aguirre, L.; Corvalán, J.; Klohn, E.; Levi, B. 1965. Geología y yacimientos metalíferos de Chile. *Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile*, 305 p. Santiago.
- Segerstrom, K. 1968. Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado, Provincia de Atacama. *Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile, Boletín*, No. 24, 58 p.
- Seward, T.M. 1984. The transport and deposition of gold in hydrothermal systems. In *Gold '82. The geology, geochemistry and genesis of gold deposits. Geological Society of Zimbabwe, Special Publication*, No.1, A.A., p. 165-181. Balkema, Rotterdam.
- Travisany, V.; Henríquez, F.; Nyström, J.O. (En prensa). Magnetite lava flow in the Pleito Melón district of the Chilean Iron Belt. *Economic Geology*.
- Vivallo, W.; Henríquez, F.; Espinoza, S. 1991. Alteración hidrotermal en el complejo volcánico El Laco, Norte de Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas*, p. 44-47. Viña del Mar.
- Vivallo, W.; Espinoza, S.; Henríquez, F. 1993. Magnetite-apatite type iron ore and gold mineralization in the Cerro Negro Norte district, Chile. In *Current Research in Geology Applied to Ore Deposits* (Fenoll Hach-Alí, P.; Torres-Ruiz, J.; Gervilla, F.; editors). *Universidad de Granada*, p. 587-590. Spain.
- Vivallo, W.; Henríquez, F.; Espinoza, S. 1994a. Zonación de la alteración en torno de los depósitos de hierro de la Franja Ferrífera Cretácica de la Cordillera de la Costa, Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas*, Vol. 2, p. 921-925. Concepción.
- Vivallo, W.; Henríquez, F.; Espinoza, S. 1994b. Significado de la distribución del oro en menas y rocas de caja en los depósitos de hierro de los distritos Cerro Negro Norte y Cerro Imán, Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas*, Vol. 2, p. 926-930. Concepción.